

アコースティックエミッション計測を適用した 橋梁モニタリングシステムの開発

Development of Bridge Monitoring System Applying Acoustic Emission Measurement

大森 隆広 碓井 隆 渡部 一雄

■ OMORI Takahiro ■ USUI Takashi ■ WATABE Kazuo

老朽化が進む社会インフラ関連の構造物を省コストで効率的に維持管理していくことが喫緊の課題となっている。

東芝は、橋梁（きょうりょう）の劣化をモニタリングするシステムの実現を目指し、これまでにない広い周波数帯域で橋梁から発生するアコースティックエミッション（AE）を検出するスーパーアコースティック（SA）センサと自立発電・無線通信機能を備え、約10年間動作可能なSAセンサユニットを組み込んだシステムを開発している。SAセンサのデータをフィルタリングし、波形の特徴量を抽出してパラメータ化することで、データ量を無線通信で伝送可能な範囲に収め、診断に必要なデータだけをサーバに蓄積できる。このシステムにより、人手による定期点検が行われるタイミング以外での劣化モニタリングが可能となり、橋梁の維持管理の効率化が期待できる。

また、国立大学法人 東京大学IRT研究機構と共同で、1 Hzから1 MHzまでの非常に広帯域な周波数特性を持つSAセンサの開発を進めており、従来複数のセンサでカバーしてきた周波数帯を一つのセンサでカバーするシステムの構築を目指している。

Accompanying the aging of social infrastructure systems in Japan in recent years, there is a pressing need for both cost-saving and more efficient maintenance of such systems.

With the aim of realizing a monitoring system to detect age-related deterioration of bridges, Toshiba has been engaged in the development of an innovative bridge monitoring system incorporating (1) "super acoustic" (SA) sensors with a wider frequency range than ever before, to detect acoustic emission (AE) waveforms generated from a bridge; and (2) a sensor unit equipped with a wireless interface and an independent power-generation system, which can operate for approximately 10 years. In this monitoring system, when AE waveforms are detected by the SA sensors, these signals are filtered and the characteristics are quantitatively extracted as AE parameters. The data are subsequently compressed to within the transmission limit of the wireless interface, and are transmitted to a data server that accumulates the AE parameters necessary to diagnose bridge deterioration. The bridge monitoring system is expected to contribute to efficient maintenance as a replacement for periodic manual inspections.

In cooperation with the Information and Robot Technology (IRT) Research Initiative at The University of Tokyo, we have also been developing an SA sensor with an extremely wide frequency range from 1 Hz to 1 MHz, which integrates several types of conventional sensors with different frequency characteristics.

1 まえがき

橋梁をはじめとする社会インフラ関連の構造物（以下、社会インフラと略記）の老朽化が課題となって久しい。2026年には、橋長15 m以上で建設後50年を経過する橋梁の数は、全体の47%と半数近くに達する⁽¹⁾。高度経済成長期に多数建設された社会インフラは、メンテナンスを繰り返しながら長年にわたって供用されてきた。一般的に耐用年数の目安とされる50年を迎え、老朽化する社会インフラを低コストで長寿命化し、維持管理していくことが喫緊の課題である。

このようななか、ICT（情報通信技術）を応用した社会インフラのモニタリング技術を開発する取組みが官民を挙げて進められている。現状の社会インフラの点検は、目視や打音など、人手に頼った方法が主流であり、費用対効果の面で必ずしも効率的とは言いがたい。また、これらの点検は、人間の到達できる領域に限られるため、内部構造の欠陥や高所及び狭所の欠陥などの検出が難しい。そこで、大幅なコスト上昇を抑

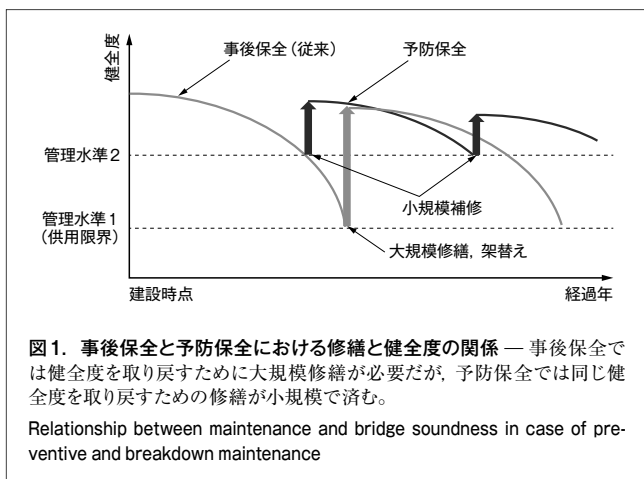
えつつ、点検及び補修の頻度を上げることで社会インフラの長寿命化を図る技術の開発が期待されている。

ここでは、東芝が開発している橋梁モニタリングシステムについて述べる。

2 橋梁の維持管理とモニタリング

一般的な橋梁の維持管理は、大きく分けて点検と補修に分類される。まず橋梁の状態を把握するため、日常的に行われる目視点検と5年に1回の詳細点検で変状を把握し、その度合いに応じたランク分けを行う。次に変状の度合いが大きく、一定のランク以上に分類された箇所に対して補修を行う。このサイクルを適切に行うことが橋梁の維持管理の要点となる。

一般に、高速道路会社や、大都市の自治体、国などが管理する橋梁では、維持管理に十分な費用と人員を割り当てることができるため、劣化が進んだ橋梁の割合は低い。一方で、地方の自治体は一つの橋に掛けられるメンテナンスコストが相対



的に低い傾向があり、低コストな維持管理技術に対するニーズが高い。

橋梁の健全度と維持管理タイミングによる補修規模の関係⁽²⁾を図1に示す。健全度が供用限界に達してから補修する事後保全的管理の場合、大規模修繕が必要となり多額のコストが発生する。比較的健全な段階で劣化の兆候を検出し、小規模補修を繰り返す予防保全の考え方を取り入れることで、トータルでのメンテナンスコストを削減し、より長期にわたって低コストでの維持管理が実現できる。

橋梁のモニタリングを実現するためには、橋梁の変状を検出できるセンサの選択が重要となる。これまでは、加速度センサや、ひずみセンサ、変位センサなどが用いられてきた。加速度センサでは、橋梁の大域的な固有振動をモニタリングし、固有振動数の変動から橋梁の大規模損傷を発見できる。ひずみセンサは、橋梁を走行する車両の活荷重計測や橋梁の供用状態監視に利用されている。変位センサは、橋梁のたわみ量や沈み込み量などの状態監視に利用される。

一方、一般に、材料に発生する損傷を検出するセンサとしては、アコースティックエミッション (AE) と呼ばれる材料の微小亀裂から発生する弾性波を検出するAEセンサが用いられている⁽³⁾。AEセンサは、非常に高感度かつ数十kHzから1MHz程度の高い帯域の周波数をセンシング対象とすることが特徴である。コンクリートや鉄で構成される橋梁の床版や、橋桁、橋脚などの構成部材内部に発生する内在欠陥の検出は、AEセンサの得意とする分野である。橋梁モニタリングへのAEセンサの適用により、橋梁の劣化の兆候を早期に検出し、ライフサイクルコスト低減に貢献することが期待できる。

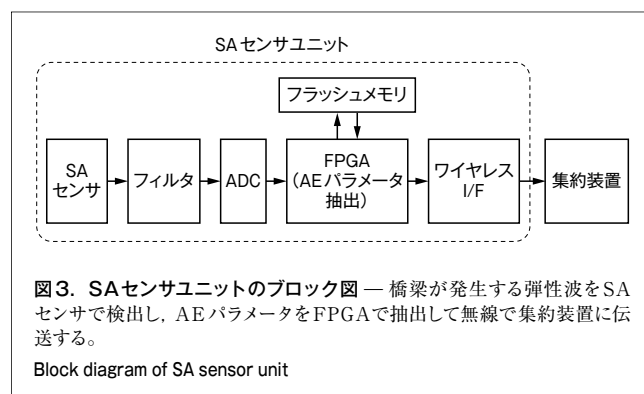
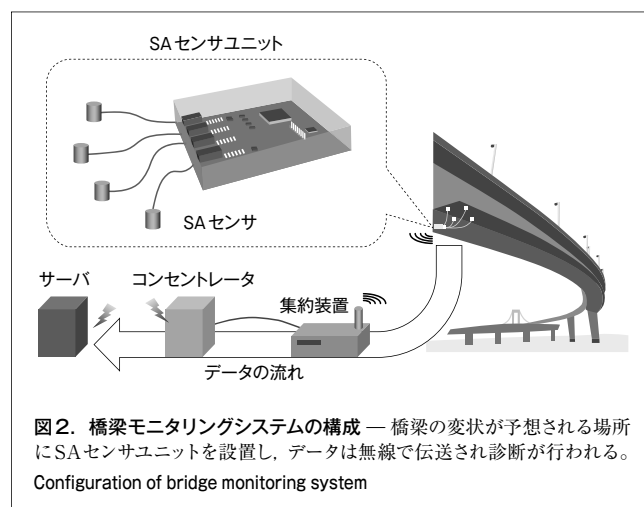
3 橋梁モニタリングシステム

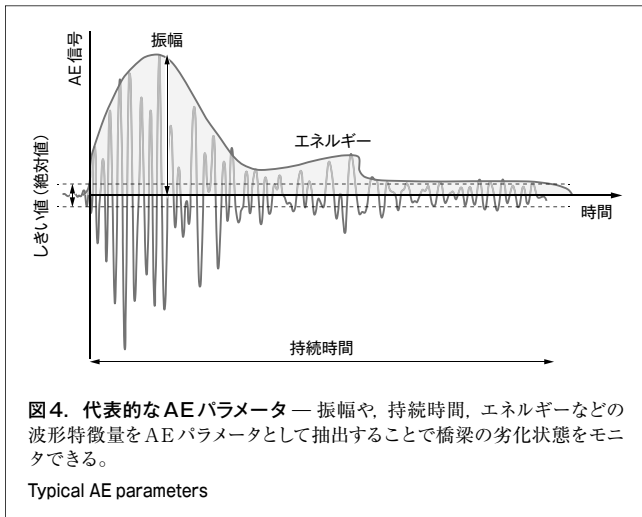
当社は、AEの検出にスーパーアコースティック (SA) センサを用いた橋梁モニタリングシステムを開発している。SAセンサは、後述するように、非常に広帯域な周波数特性を持つこと

を特徴とするセンサデバイスであり、従来複数のセンサで計測していた1 Hzから1 MHzに及ぶ帯域を一つのSAセンサで計測することができる。コンクリート製や鉄製の橋梁における損傷は、初期の亀裂発生段階では非常に高い帯域 (数十kHzから数百kHzまで) の弾性波が発生し、損傷が進行するにしたがって発生する弾性波の周波数帯域が低下するという特徴がある。最終的には数Hzの帯域まで低下することから、1 Hzから1 MHzまでの帯域をカバーするSAセンサを用いて橋梁をモニタリングすることで、橋梁の損傷段階に関わらず適切な診断をすることが可能になる。

SAセンサを接続した橋梁モニタリングシステムのイメージを図2に示す。橋梁の変状が予想される場所にSAセンサユニットを設置し、取得されたデータを無線によって集約装置に伝送する。データは最終的にサーバ内で分析され、劣化や変状の進行度合いの診断が行われる。

SAセンサユニットのブロック図を図3に示す。SAセンサの出力は、まずフィルタによる前処理を経てからADC (アナログデジタル変換器) でデジタル変換される。次に不揮発性FPGA (Field Programmable Gate Array) により波形特徴量を抽出し、得られたデータをフラッシュメモリ内に保存する。保存されたデータは、ワイヤレスインタフェース (I/F) を介して無線





で集約装置に転送される。

数十kHzから1MHzまでの高い周波数帯域のデータを収集する際には、波形特徴量として、発生時刻や、振幅、持続時間、立上り時間、エネルギー、カウントなどのAEパラメータと呼ばれる値を算出する。AEパラメータの例を図4に示す。AEパラメータの値は、橋梁の変状の情報を含んでいる可能性が高く、収集されたデータをサーバで分析することで劣化の状態を知ることができる。

複数個のSAセンサを搭載することで、各SAセンサへの信号の到達時間差からAEの発生場所を推定することも可能である。AE発生源からある程度離れた位置に設置しても、AEが減衰せずに複数のSAセンサまで到達すれば位置を推定できるため、比較的広い範囲での劣化監視に適用が期待される。

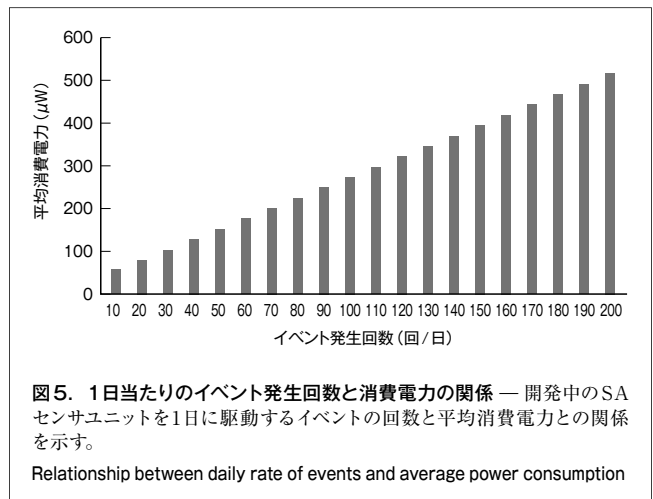
SAセンサユニットは、自立発電と組み合わせて稼働する予定であり、いかに省電力化を図るかもポイントの一つである。この方法の一つとして、常時稼働とせずに、計測時、通信時、及び待機時の3モードに分けることを検討している。各モードの動作状態と消費電力の見込みを表1に示す。消費電力の値は、AEの帯域を処理するために必要な性能を持つ処理系のカタログ値から推定した。計測時には通信部(ワイヤレスI/Fなど)以外の全ての領域がアクティブ状態になり、通信時はFPGAと通信部だけをアクティブ状態にする。待機時は全ての領域をスリープ状態とすることで、消費電力の高い計測時と

表1. モード別の動作状態と消費電力

Operating states and power consumption of each component in three modes

モード	動作状態				消費電力 (mW)
	センサ	アナログ部	FPGA	通信部	
計測時	Active	Active	Active	Sleep	114.6
通信時	Sleep	Sleep	Active	Active	98.1
待機時	Sleep	Sleep	Sleep	Sleep	0.031

Active: アクティブ状態 Sleep: スリープ状態

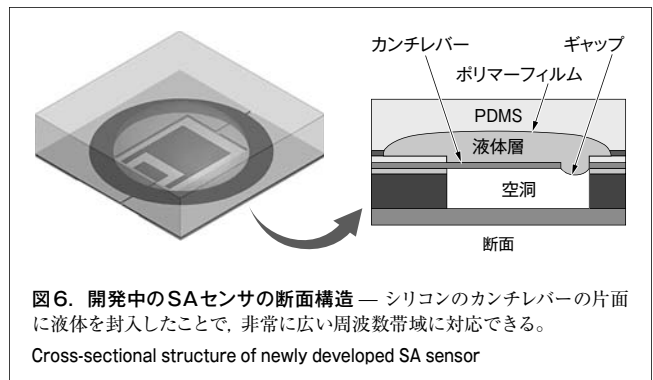


通信時の割合を極力削減する。計測や通信のタイミングは必要に応じて任意であり、例えば定期的に行うとか、大きな負荷が作用したときだけ計測するとかの工夫が可能である。

1回当たりの計測を1秒、通信も1秒と仮定し、1日のイベント発生回数による平均消費電力を算出したグラフを図5に示す。例えば、1日に計測が必要とされるイベントが100回起きたと仮定すると、平均消費電力は270 μ Wと算出される。この消費電力を賄うことができる自立発電デバイスと組み合わせることで、一度設置した後は10年程度の間メンテナンスなしで自律駆動可能になる予定である。

4 SAセンサ

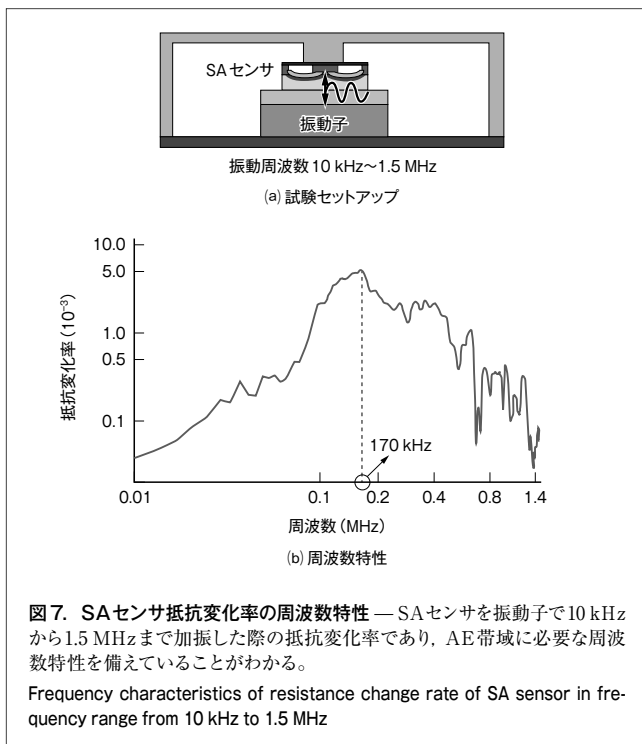
東京大学IRT研究機構と共同で開発中のSAセンサ^{(4), (5)}は、1Hzから1MHzまでの非常に広い帯域で感度を持つMEMS (Micro Electro Mechanical Systems) によるセンサデバイスである。当社は、技術研究組合 NMEMS技術研究機構において、東京大学と共同でSAセンサの橋梁モニタリングへの適用を推進している。SAセンサの模式図を図6に示す。SAセンサは、シリコンのカンチレバーの片面に液体層を設けている。ポリジメチルシロキサン (PDMS: Poly (dimethylsiloxane))



側から伝達される弾性波は、液体を介してカンチレバーを振動させる。カンチレバーは、厚さがおよそ300 nmと非常に薄く、サイズも100 μm角程度と小さいため、表面張力により液体の表面に沿って振動する。カンチレバーの片持ち部に形成されたピエゾ抵抗層に振動によるひずみが発生することで、抵抗変化率として出力が得られる。ギャップ部は数 μm程度のトレンチで形成され、液体の表面張力により液体の漏れが抑制されている。

SAセンサの特徴である非常に広い帯域は、片面に液体を封入することによって得られる。大気中でのカンチレバーの振動特性は、固有振動数の影響を強く受け、固有振動数の周波数近傍では大きな振幅が得られるが、それ以外の周波数では振幅が極端に小さくなる。液体の表面に沿ってカンチレバーが振動することで、大気中の固有振動数の影響を受けなく、広い帯域での応答が得られる。

AEで対象とされる10 kHzから1 MHzまでのSAセンサの周波数特性を図7に示す。図7(a)は特性取得時のセットアップである。圧電素子の振動子の上にSAセンサのPDMS部を接触させ、振動子を10 kHzから1.5 MHzまで振動させて抵抗変化率を取得した。抵抗変化率と周波数の関係を図7(b)に示す。抵抗変化率は170 kHzをピークとする周波数特性を持ち、1.2 MHz程度まで有意な応答が確認できる。カンチレバーの大気中での固有振動数は13.4 kHzであり、固有振動数よりも十分に高い帯域でも応答が得られることがわかる。この結果から、SAセンサはAE帯域に必要な超音波帯域を含む、広い周波数特性を確保していると言える。



5 あとがき

劣化が進行する社会インフラの長寿命化やライフサイクルコスト低減は、社会全体で取り組むべき大きな課題である。当社は、過去に培ってきた基盤技術を応用し、ICTを利用したセンシング技術を開発することで、橋梁をはじめとする社会インフラの劣化を早期に検知するモニタリングシステムを開発している。非常に広い周波数特性を持つSAセンサを搭載し、10年間の耐久性を備えた自立発電で動作可能なSAセンサユニットは、橋梁をはじめ、社会インフラの様々な領域への応用が期待できる。

ここで述べた成果の一部は、国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託研究業務「インフラ維持管理・更新等の社会課題対応システム開発プロジェクト」で得られたものである。また、SAセンサデバイスの開発は、東京大学IRT研究機構の下山勲教授や松本潔教授らと共同で進めた成果である。

文献

- (1) 国土交通省道路局. "V 既存ストックの長寿命化". 平成18年度道路行政の達成度報告書 平成19年度道路行政の業績計画書. 2007. <<http://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-perform/h19/11.pdf>>. (参照 2015-07-24).
- (2) 産業競争力懇談会. 産業競争力懇談会 2013年度 プロジェクト 最終報告 インフラ長寿命化技術. 2014. <<http://www.cocn.jp/common/pdf/thema59-L.pdf>>. (参照 2015-07-24).
- (3) 大津政康. アコースティック・エミッションの特性と理論：構造物の診断と破壊現象解析. 第2版. 森北出版, 2005, 160p.
- (4) Khang-Quang, P. et al. "Multi-axis force sensor with dynamic range up to ultrasonic". Proceedings of 2014 IEEE 27th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS 2014). San Francisco, CA, USA, 2014-01, IEEE. 2014, p.769 - 772.
- (5) Kaneko, T. et al. "Pulse wave measurement in human using piezoresistive cantilever on liquid". Proceedings of 2015 IEEE 28th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS 2015). Estoril, Portugal, 2015-01, IEEE. 2015, p.670 - 673.



大森 隆広 OMORI Takahiro

技術開発統括部 研究開発センター 機械・システムラボラトリー研究主務。インフラモニタリングシステムの開発に従事。日本機械学会、エレクトロニクス実装学会会員。Mechanical Systems Lab.



碓井 隆 USUI Takashi

技術開発統括部 研究開発センター 機械・システムラボラトリー研究主務。インフラモニタリングシステムの開発に従事。応用物理学会、IEEE会員。Mechanical Systems Lab.



渡部 一雄 WATABE Kazuo

技術開発統括部 研究開発センター 機械・システムラボラトリー研究主幹。インフラモニタリングシステムの開発に従事。日本光学会、土木学会、米国光学会 (OSA) 会員。Mechanical Systems Lab.